

Романюк Л.А.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Чихіра І.В.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

У статті досліджується структура системи управління повітряним рухом безпілотного літального апарату, описано основні складники системи, що входять до загальної сукупності апаратного забезпечення комплексу автоматизованого управління рухом. Розкрито вдосконалену методику побудови системи управління та описано функціональні та структурні особливості складників системи автоматизованого управління системою навігації. Визначено блочну структуру системи управління повітряним рухом безпілотного літального апарату. Запропоновано алгоритм реалізації автоматизованої системи управління із моделюванням на реальних об'єктах результату дієвості. Охарактеризовано вплив керуючих механізмів на загальну побудову траєкторії руху з наведенням сигналів управління. Визначено частку впливу помилок усталеного польоту під час відпрацювання вхідного корисного сигналу (команд управління) за наявності перешкод, ліній радіоуправління та сигналів команд управління рухом безпілотного літального апарату. Запропоновано математичний складник флуктуаційної помилки, яка визначається спектром перешкоди, що знаходиться всередині смуги пропускання. Встановлено, що збільшення смуги пропускання призводить до зменшення динамічної помилки і збільшення флуктуаційної помилки, натомість зменшення смуги пропускання призводить до збільшення динамічної і зменшення флуктуаційної помилки. Розроблено структурну схему системи управління польотом безпілотного літального апарату, яка містить потенціометри – датчик і прийомник, пристрій порівняння вхідного і вихідного сигналів, підсилювач, електричний двигун з редуктором і тахогенератор для вимірювання швидкості обертання вала двигуна безпілотного літального апарату. Досліджено перехідний процес без коригуючих ланок та з урахуванням останніх. Доведено, що застосування додаткових нелінійних коригуючих елементів під час надходження на підсилювач сигналу різниці між положеннями движків потенціометрів і зі знаком «мінус» сигналу з виходу тахогенератора дає позитивний вплив на стабілізацію руху безпілотного літального апарату.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, управління повітряним рухом, простір, автоматизована система, політ.

Постановка проблеми. Проблеми автоматизованого управління повітряним рухом безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є актуальними в умовах сьогодення, з урахуванням ситуації, що склалася на Сході України. Використання БПЛА в умовах розвідки є пріоритетним напрямом формування стратегічних дій українських військових формувань. Побудова автоматизованої системи управління повітряним рухом БПЛА здійснюється як система збільшення стійкості для наземного пілота, що передбачає підвищення безпеки польотів та покращення характеристик траєкторії формування шляху БПЛА.

Використання автоматизованого управління, реалізує субоптимальний контроль за траєкторією польоту як одного БПЛА, так і групи слідкуючих об'єктів.

Методика побудови автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА базується на

модельно-орієнтованому проектуванні. Для забезпечення польоту БПЛА в умовах перешкод є можливість здійснювати формування характеристик стабільності та керованості на всіх рівнях маневрування.

Головними джерелами вихідної інформації є математична модель динаміки БПЛА, виконуючі пристрої, сенсори, датчики, функції систем орієнтації та кінцева точка шляху. На основі згаданих параметрів та обмежуючих факторів автоматизована система управління повітряним рухом БПЛА повинна сформулювати траєкторію шляху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Масштабність сучасних наукових досягнень за темою дослідження є суттєвою. Питання формування системи автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА у своїх роботах розглядали як зарубіжні, так і вітчизняні вчені.

В.І. Гриценко, О.Є. Волков, М.М. Комар, Ю.П. Богачук [1] дослідили головні аспекти оптимізації системи управління легкого безпілотного літального апарату за частотним критерієм, математично обґрунтувавши вибір напрямку руху та обхід перешкод. В.П. Бабенко [2] обґрунтував схемами та розрахунком інформаційно-вимірну та управляючу систему малорозмірного безпілотного літального апарату підвищеної точності. Стосовно автоматичного управління системою навігації БПЛА варто відмітити роботи І.О. Кашасєва, О.А. Усачова, С.М. Новічонка, В.М. Петрова [3], О.В. Ярового [4], О.А. Мясіщева, В.В. Швеця [5] та інших. Автори детально описують можливість застосування автоматичного управління системою навігації БПЛА в умовах перешкод та механізми формування траєкторії польоту. Низка сучасних авторів М.Н. Ясечко, А.І. Дохов, М.Г. Іванець, О.В. Тесленко [6] з фізико-математичного погляду описують вплив радіоелектронної апаратури під час управління БПЛА з відокремленням параметрів сигналів випромінювачів. Щодо використання БПЛА та управління в умовах перешкод під час проведення воєнних дій, то варто відмітити праці таких науковців, як М.Н. Ясечко, А.В. Очкурєнко, А.А. Ковальчук, Д.В. Максютя [7], які наводять короткий огляд сучасних засобів придушення радіоелектронної апаратури та перехоплення управління безпілотних літальних апаратів сил антитерористичної операції. Автори детально описують можливість застосування засобу функціонального ураження радіоелектронних систем БПЛА. Із зарубіжних вчених варто відмітити роботи Williams P., та Crump M [8] та Tang D., Li F., Shen N., і Guo S. [9]. Однак, попри результати наукових розробок відповідно до теми дослідження, питання розробки системи автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА залишається відкритим та потребує детального вивчення.

Постановка завдання. У статті необхідно розробити автоматизовану систему управління повітряним рухом безпілотним літальним апаратом.

Виклад основного матеріалу дослідження. Якість управління польотом БПЛА визначається помилками усталеного польоту за відпрацювання вхідного корисного сигналу (команд управління) за наявності перешкод.

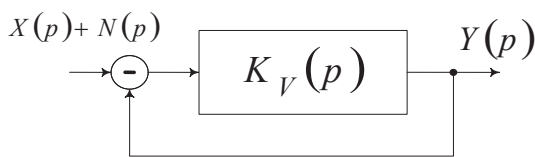


Рис. 1. Загальна схема управління польотом БПЛА

де $X(p)$ – вхідний сигнал команд управління; $N(p)$ – перешкоди лінії радіоуправління.

Для якісного представлення помилок управління будемо вважати, що канал тангажу БПЛА є ФНЧ (фільтр нижніх частот) зі смугою (рис. 1).

$$K_0(\omega) = \begin{cases} 1, & 0 < \omega \leq \omega_0 \\ 0, & \omega > \omega_0 \end{cases}, \quad (1)$$

де $K_0(p) = \frac{K_v(p)}{1 + K_v(p)}$ – передавальна характеристика замкнутого каналу тангажу;

$\omega_0 = \frac{1,5}{T}$ – смуга пропускання замкнутого каналу тангажу.

Нехай вхідний сигнал $x(p)$ має енергетичний спектр $S_X(\omega)$, потужність якого зменшується зі збільшенням частоти. Як перешкоду будемо розглядати «білий» шум з постійною спектральною щільністю $S_N(\omega) = \frac{N_0}{2}$.

Тоді динамічна помилка відпрацювання корисного вхідного сигналу буде визначатися (рис. 2):

$$\bar{Z}_{дин}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{N_0}^{\infty} S_X(\omega) \cdot |1 - K_0(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} S_X(\omega) d\omega, \quad (2)$$

тобто буде частиною спектра корисного сигналу, який знаходиться за межами смуги пропускання ω_0 і не відпрацьовується системою.

Флуктуаційна помилка визначається спектром перешкоди, який знаходиться всередині смуги пропускання [6]:

$$\bar{Z}_{фл}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} S_N(\omega) K_0^2(\omega) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} S_N(\omega) d\omega \quad (3)$$

З рис. 1 легко побачити наступне:

1) Збільшення смуги пропускання ω_0 призводить до зменшення $\bar{Z}_{дин}^2$ динамічної помилки та збільшення $\bar{Z}_{фл}^2$ флуктуаційної помилки.

2) Зменшення смуги пропускання ω_0 призводить до збільшення динамічної помилки та зменшення флуктуаційної.

Є оптимальна смуга ω_{0opt} , коли сумарна помилка буде мінімальною:

$$\bar{Z}_{\Sigma min}^2 \Big|_{\omega_0 = \omega_{opt}} = \bar{Z}_{дин}^2 + \bar{Z}_{флук}^2 \quad (4)$$

Для цього в каналі тангажу повинна бути система, що забезпечує її оптимальну смугу.

Для комп'ютерного дослідження смуги пропускання БПЛА (знаходження динамічної помилки) на вхід каналу управління потрібно подати сигнал "Ramp" і за допомогою ключів забезпечити включення всіх ланцюгів. За різницею між вхідною

функцією та вихідною визначається динамічна помилка (рис. 3).

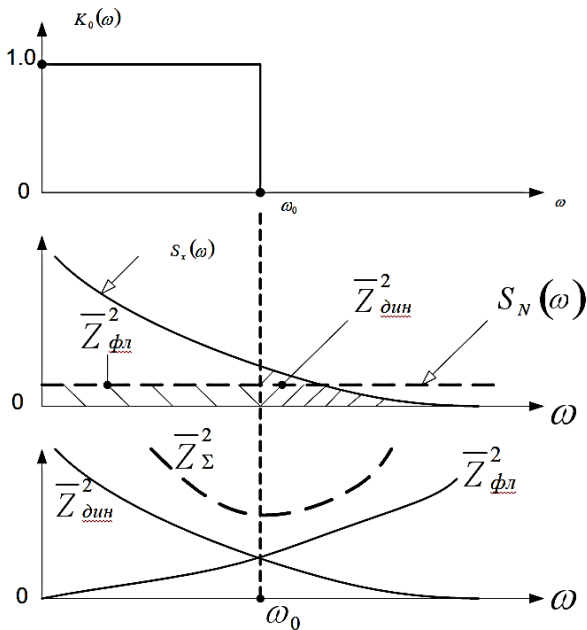


Рис. 2. Смуга пропускання БПЛА

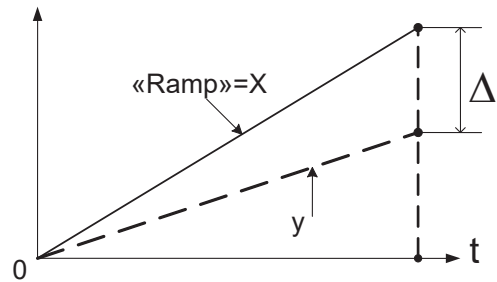


Рис. 3 Динамічна помилка [7]

У теорії автоматичного регулювання відомо, що застосування додаткових нелінійних елементів дозволяє покращувати перехідні процеси, зокрема в слідкуючих системах. Таким чином, для підвищення якості управління повітряним рухом безпілотним літальним апаратом основний акцент зробимо на стабілізації руху за рахунок аналізу інформації з датчиків обробки інформації. Блок-схема елементів безпілотного літального апарату наведена на рис. 4.

Основна ідея полягає в удосконаленні процесу стабілізації заданого руху таким чином, щоб у разі великого відхилення від нього спостерігалася

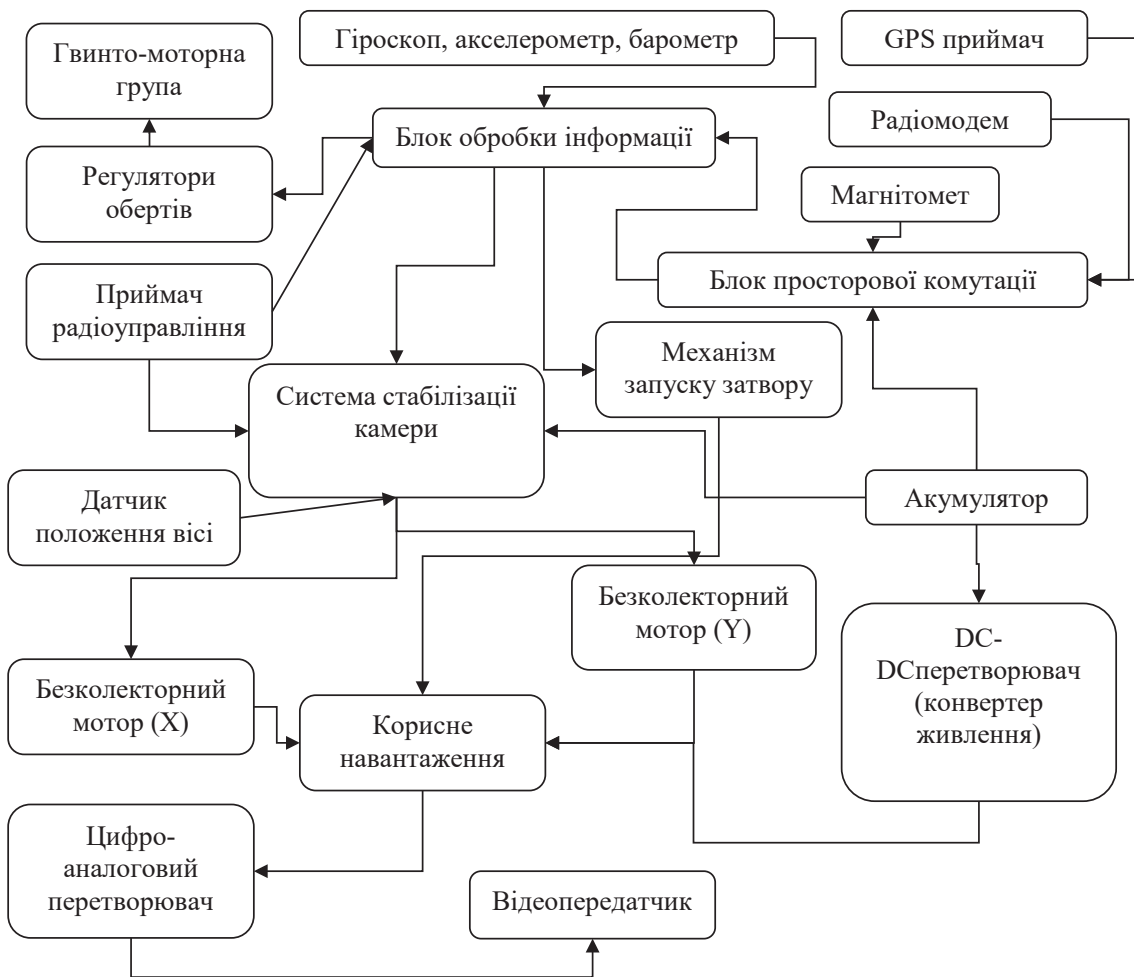


Рис. 4. Блок-схема елементів безпілотного літального апарату

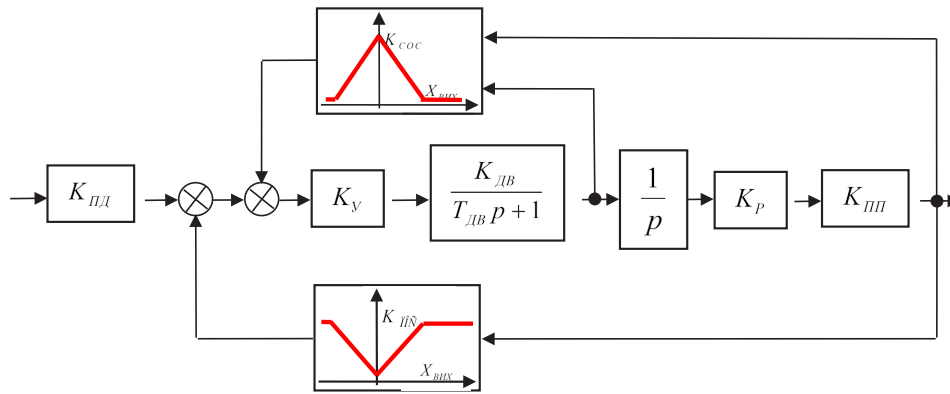


Рис. 5. Структурна схема системи управління польотом БПЛА

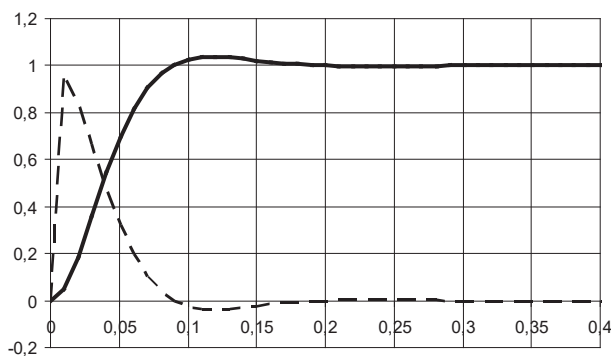


Рис. 6. Перехідний процес без коригуючих ланок

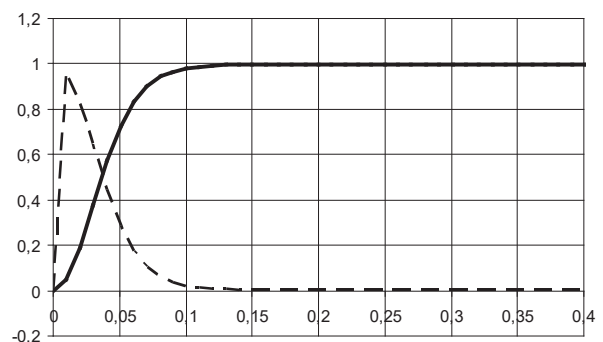


Рис. 7. Перехідний процес з коригуючими ланками

тенденція досягати зближення, і на це спрямовувати ресурс регулятора, а по мірі зменшення відхилення ресурс регулятора спрямовувався на відвернення перерегулювання.

Таким чином, маємо ПД регулятор, у якому функції зменшення відхилення і демпфування процесу зменшення є пов'язаними і керуються на більш високому рівні, тобто регулятор зі змінними, керованими на вищому рівні параметрами.

Типова схема системи управління повітряним рухом БПЛА містить потенціометри – датчик і прийомник, пристрій порівняння вхідного і вихідного сигналів, підсилювач, електричний двигун з редуктором та, тахогенератор для вимірювання швидкості обертання вала двигуна. Перехідний процес без коригуючих ланок наведено на рис. 6.

На підсилювач подається сигнал різниці між положеннями движків потенціометрів та зі знаком

«мінус» сигнал з виходу тахогенератора. Ці сигнали перетворюємо, пропускаючи їх через додаткові нелінійні коригуючі елементи, та отримаємо результат рис. 7.

Висновки. У статті розкрито методику побудови автоматизованої системи управління повітряним рухом безпілотним літальним апаратом. Наведена схема є вдосконаленою методикою побудови системи управління повітряним рухом безпілотним літальним апаратом в умовах перешкод. Система управління, що описана, може бути використана як інтелектуальна система стійкості БПЛА в умовах формування траєкторії польоту.

Алгоритм побудови системи управління повітряним рухом безпілотного літального апарата є стійким до впливу зовнішніх та внутрішніх впливів.

Список літератури:

1. Гриценко В.І., Волков О.Є., Комар М.М., Богачук Ю.П. Інтелектуалізація сучасних систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2018. № 1 (191). С. 45–59.
2. Бабенко В.П. Формування траси польоту БПЛА під час планування розвідувальних операцій. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей XXVII міжнарод-

ної науково-практичної конференції Micro CAD-2019, (15–17 травня 2019 р.) : у 5 ч. Ч. V. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків : НТУ «ХПІ». С. 15–16.

3. Кашаєв І.О., Усачова О.А., Новічонок С.М., Петров В.М. Застосування безпілотних літальних апаратів для вирішення задач моніторингу об'єктів аеродромної інфраструктури. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2019. № 2. С. 48–58.

4. Яровий О.В. Вибір оптимальних моделей безпілотних літальних апаратів та систем управління для виконання задач щодо моніторингу наземних об'єктів. *Молодий вчений*. 2018. № 5(1). С. 190–196.

5. Мясіщев О.А., Швець В.В. Режими польоту контролерів польоту arm 2.6 і rixhawk БПЛА. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2018. № 1 (257). С. 78–82.

6. Методы формирования и фокусировки электромагнитного излучения для воздействия на радиоэлектронные средства / М.Н. Ясечко, А.И. Дохов, М.Г. Иванец, О.В. Тесленко. Харьков : ХУПС, 2015. 220 с.

7. Современные радиотехнические средства борьбы с беспилотными летательными аппаратами в зоне проведения АТО / М.Н. Ясечко, А.В. Очкуренко, А.А. Ковальчук, Д.В. Максютя. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2015. № 3(44). С. 54–57.

8. Williams P., Crump M. All-source navigation for enhancing UAV operations in GPS-denied environments. *Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences*. Brisbane, 2012. URL: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/130.PDF (Last accessed: 17.03.2020).

9. UAV attitude and position estimation for vision-based landing / D. Tang et al. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. IEEE, 2011. Vol. 9. P. 4446–4450.

Romaniuk L.A., Chykhira I.V. AUTOMATED AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

The article examines the structure of the air traffic control system of an unmanned aerial vehicle, describes the main components of the system that are included in the total hardware of the automated traffic control complex. An improved methodology for constructing a control system is disclosed and the functional and structural features of the components of the automated control system of the navigation system are described. The block structure of the air traffic control system of an unmanned aerial vehicle is determined. An algorithm for the implementation of an automated control system with modeling on real objects the result of effectiveness is proposed. The influence of control mechanisms on the general construction of the trajectory of movement with the indication of control signals is characterized. The share of the influence of stable flight errors during the development of the input useful signal (control commands) in the presence of obstacles, radio control lines and signals of the motion control commands of an unmanned aerial vehicle is determined. The mathematical component of the fluctuation error is proposed, which is determined by the spectrum of the obstacle inside the passband. It is established that an increase in the passband leads to a decrease in the dynamic error and an increase in the fluctuation error, while a decrease in the passband leads to an increase in the dynamic and a decrease in the fluctuation error. A structural diagram of the flight control system of an unmanned aerial vehicle is developed, containing potentiometers – a sensor and a receiver, a device for comparing input and output signals, an amplifier, an electric motor with a gearbox, and a tachogenerator for measuring the rotational speed of the motor shaft of an unmanned aerial vehicle. The transition process is studied without corrective links and taking into account the latter. It is proved that the use of additional nonlinear correction elements when the signal between the positions of the potentiometer engines and the minus sign of the signal from the output of the tachogenerator arrives at the amplifier gives a positive effect on the stabilization of the movement of the unmanned aerial vehicle.

Key words: unmanned aerial vehicle, air traffic control, space, automated system, flight.